

超臨界圧テストプラントによる諸実験

Experimental Results of Supercritical Test Plant

田村 善助*
Zensuke Tamura

中野 善之**
Yoshiyuki Nakano

浅井 治**
Osamu Asai

内 容 梗 概

日立製作所日立研究所に設置されている純国産の超臨界圧テストプラントは、昭和35年10月の火入式以来現在までに延べ約7,000時間の順調な運転を行ない、超臨界圧プラントの諸技術的問題に対して数々の成果をあげてきた。本報においてはこれらの成果のうち超臨界圧水の伝熱流動、ボイラの動特性、超臨界圧蒸気中の銅の挙動について報告する。

1. 緒 言

火力発電所は年々高能率化をめざし高温高压大容量化している。そして外国においてはすでに超臨界圧火力プラントが営業運転にはいっており、わが国においても超臨界圧プラントが採用されはじめている。

日立製作所においては超臨界圧時代の到来を早くから予想し、昭和32年より各部門にわたりそれに対処する態勢をととのえてきた。昭和35年10月に超臨界圧火力プラント開発に必要な諸技術的問題を究明するため、超臨界圧テストプラントを完成し、その後広範囲の研究を行なってきた。このテストプラントは純国産であり、火入式以来すでに延べ7,000時間の運転を行ないその間、数々の研究成果をあげてきている^{(1)~(4)}。その結果、超臨界圧状態における特異な諸現象および超臨界圧プラントの諸機器に関する多くの経験を積むと同時に超臨界圧プラント設計に対する多くの資料を得ることができた。本報においてはこれらの成果のうち、超臨界圧水の伝熱流動、並列管の偏流、超臨界圧ボイラの動特性、超臨界圧蒸気における銅の溶解、析出などについて報告する。

2. テストプラントの概要⁽¹⁾⁽²⁾

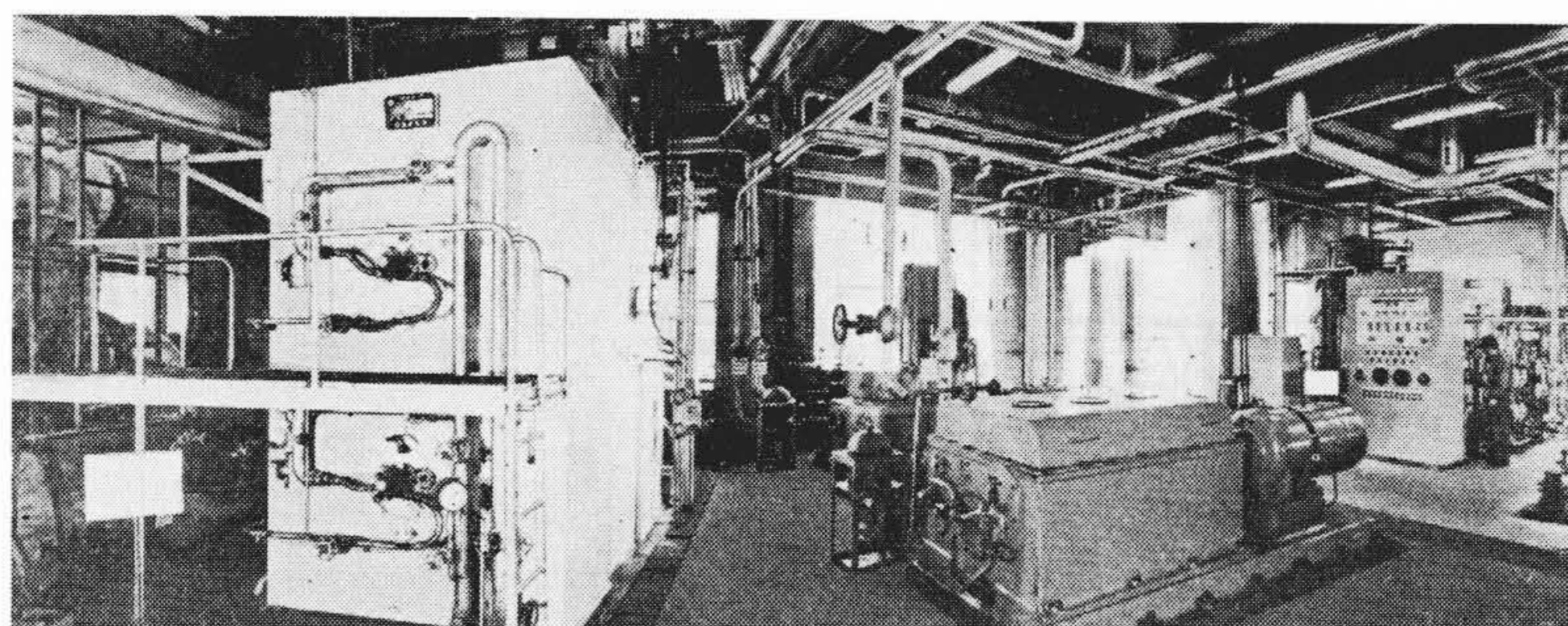
本テストプラントは基礎研究、応用研究の両面をもち、研究内容もボイラ特性、伝熱流動、出力制御、起動法、給水処理、デポジットなど超臨界圧プラント開発上の諸技術的問題を解明するために広範囲の実験ができるように計画されている。本テストボイラの最高圧力、温度および蒸発量はそれぞれ350 kg/cm²、650°C、2 t/hである。

第1図はテストプラント1階の写真である。1階にはボイラ、ボイラ給水ポンプ2台（吐出圧450 kg/cm²、吐出量1.5 t/h）、純水装置、分析室、銅の溶解、析出実験装置などがある。

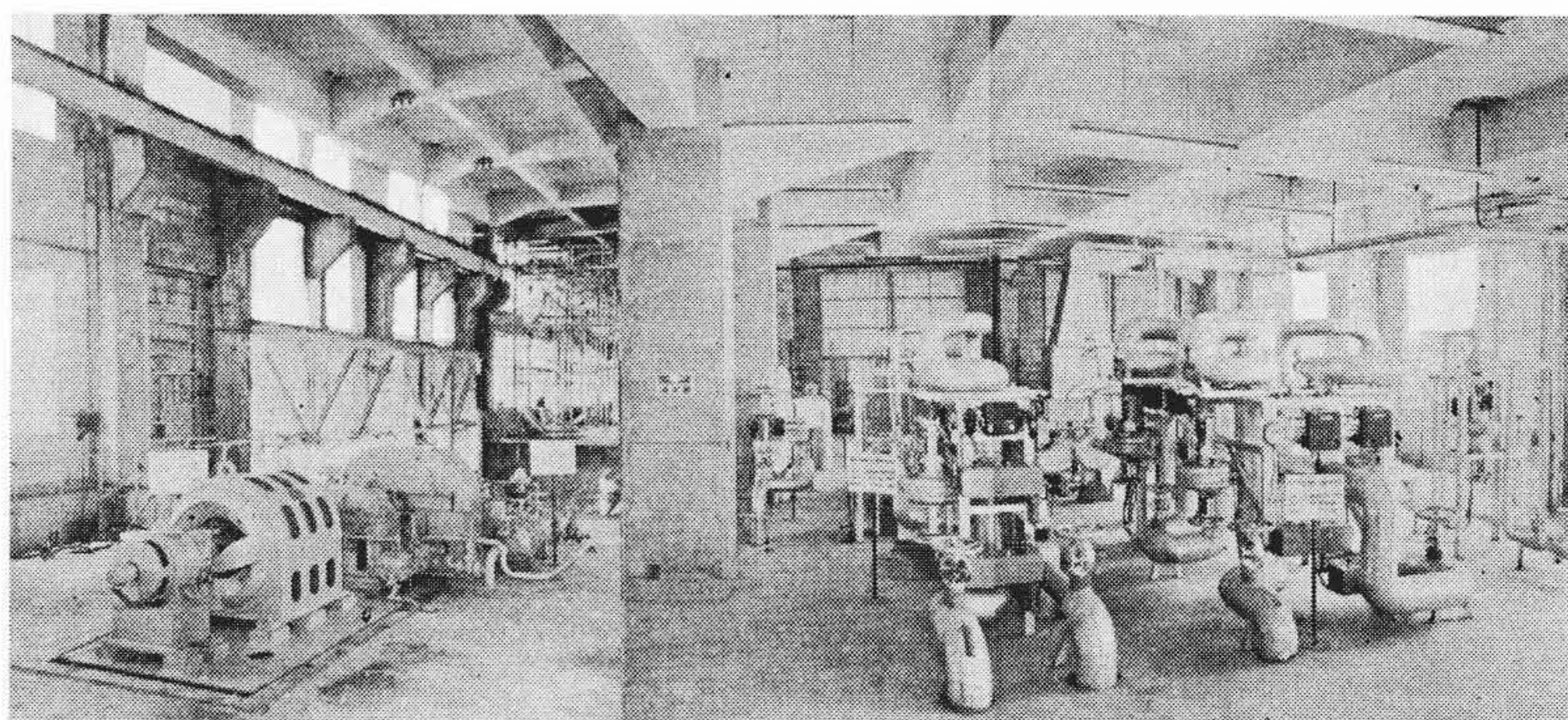
第2図は2階の写真で、2階にはタービン、発電機、バイパス系統、注水系統などの弁、減温器、汽水ミキサ、材料試験装置、制御室などがある。第3図はテストプラントの中央制御室である。ここには全プラントの制御系はもちろん、各機器の制御系およびプラント、ボイラの各部の温度、圧力、各分析値を記録する計器もすべて集められている。伝熱流動研究のためのテストセクションは3階にある。

3. 伝 熱 流 動

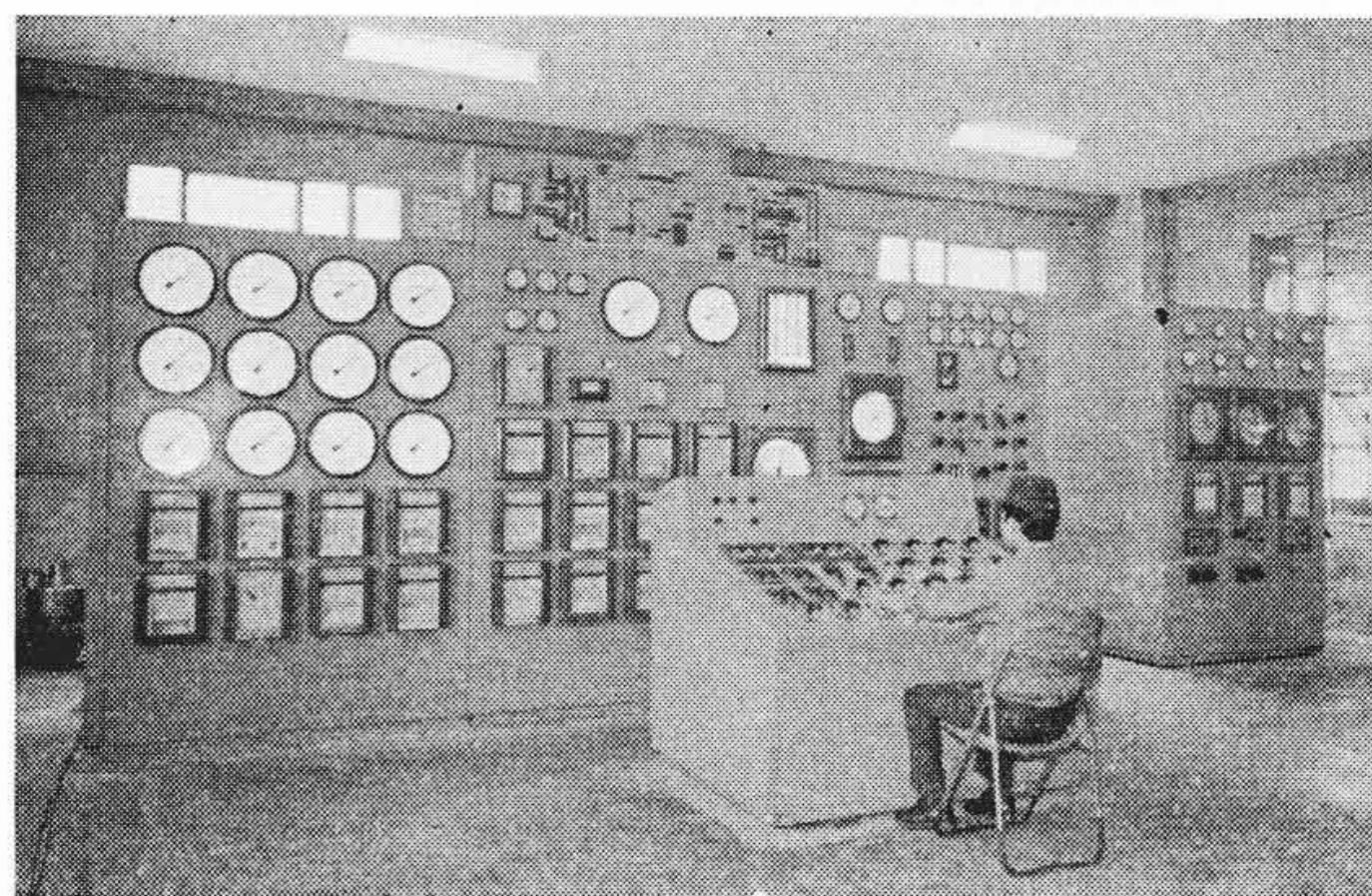
超臨界圧水の熱伝達率、摩擦係数は管内流速、管肉厚、伝熱面配



第1図 テストボイラ、給水ポンプ、純水装置



第2図 タービン発電機および減圧減温装置

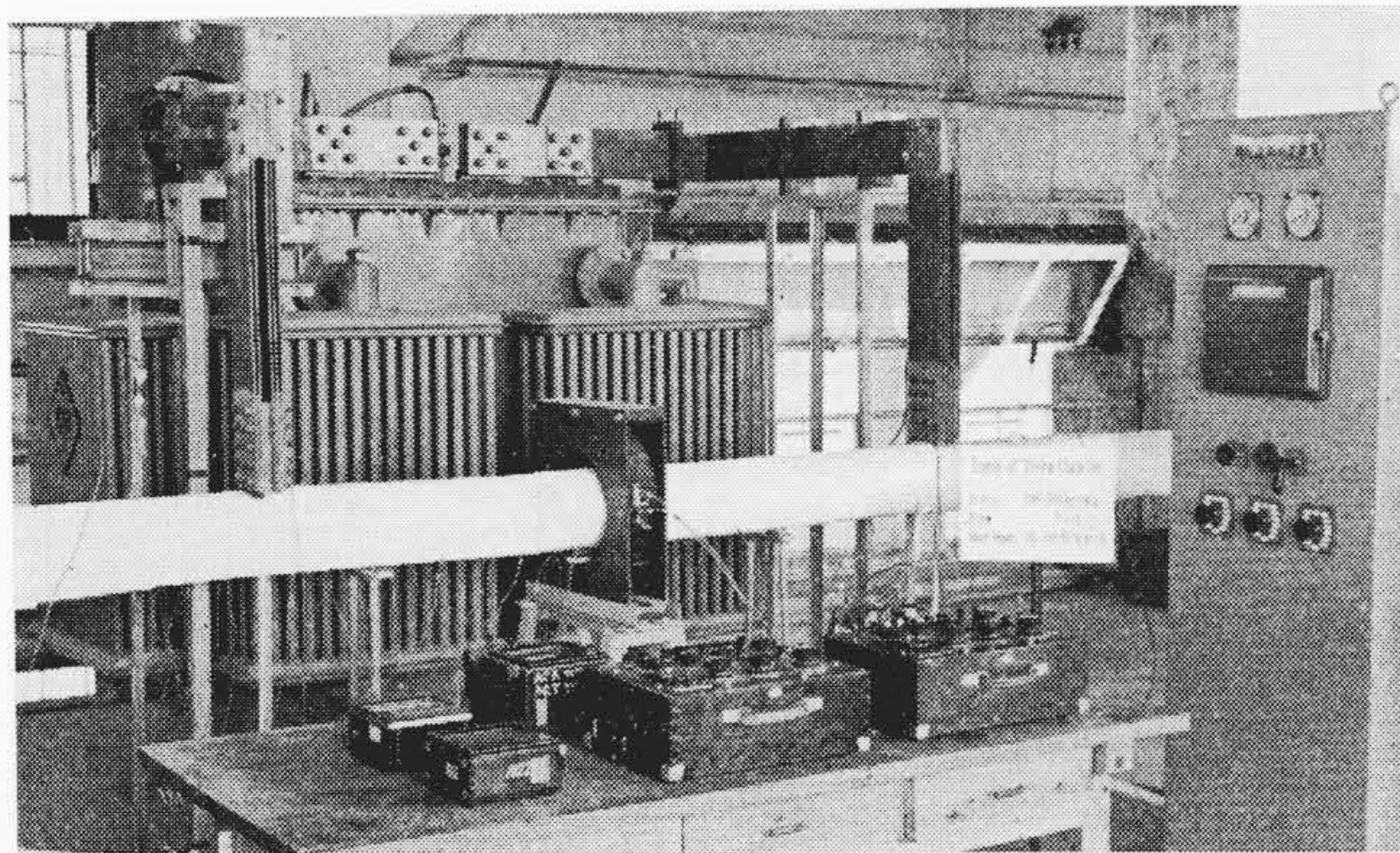


第3図 中 央 制 御 室

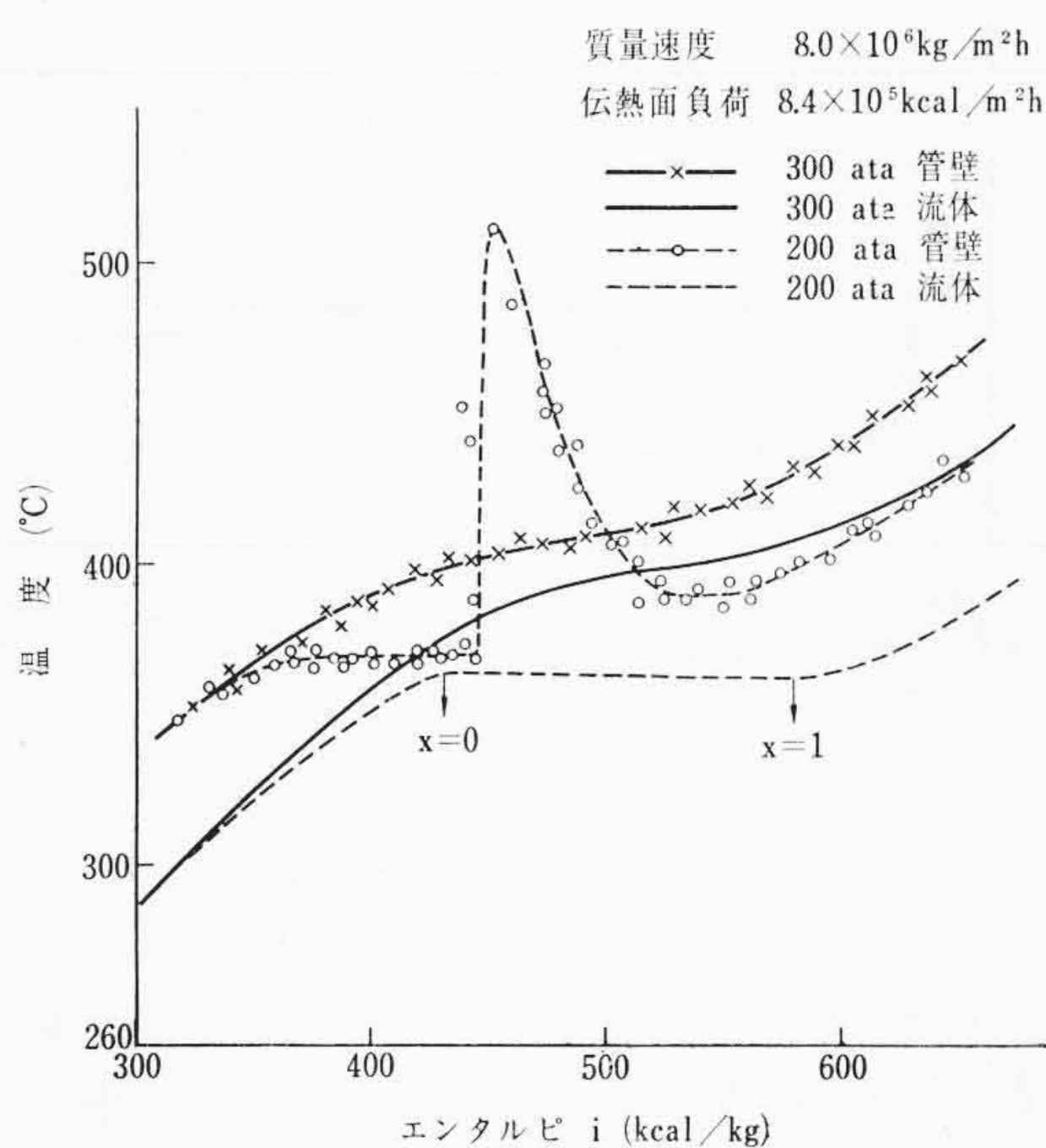
置の決定、ボイラ給水ポンプの仕様決定など超臨界圧ボイラ計画に重要な因子であるが、現在これらのデータはきわめて少ない⁽⁵⁾。本プラントにおいてはこれらの伝熱流動の基礎研究を行ない、広範囲の設計資料を得るためのテストセクションを主蒸気管と並列にボイラ出口に設置してある。このテストセクションは180 kVAのトランスにより直接パイプに通電し、管内流体を加熱するようになっており加熱区間は2mである。パイプの材質は15-15 N, SUS 32, STB 42Aで、管内径には10~20 mmの範囲のものを使っている。第4図

* 日立製作所日立研究所 工博

** 日立製作所日立研究所



第4図 テストセクション



第5図 超臨界圧と亜臨界圧状態における伝熱特性の比較

はテストセクションの写真である。

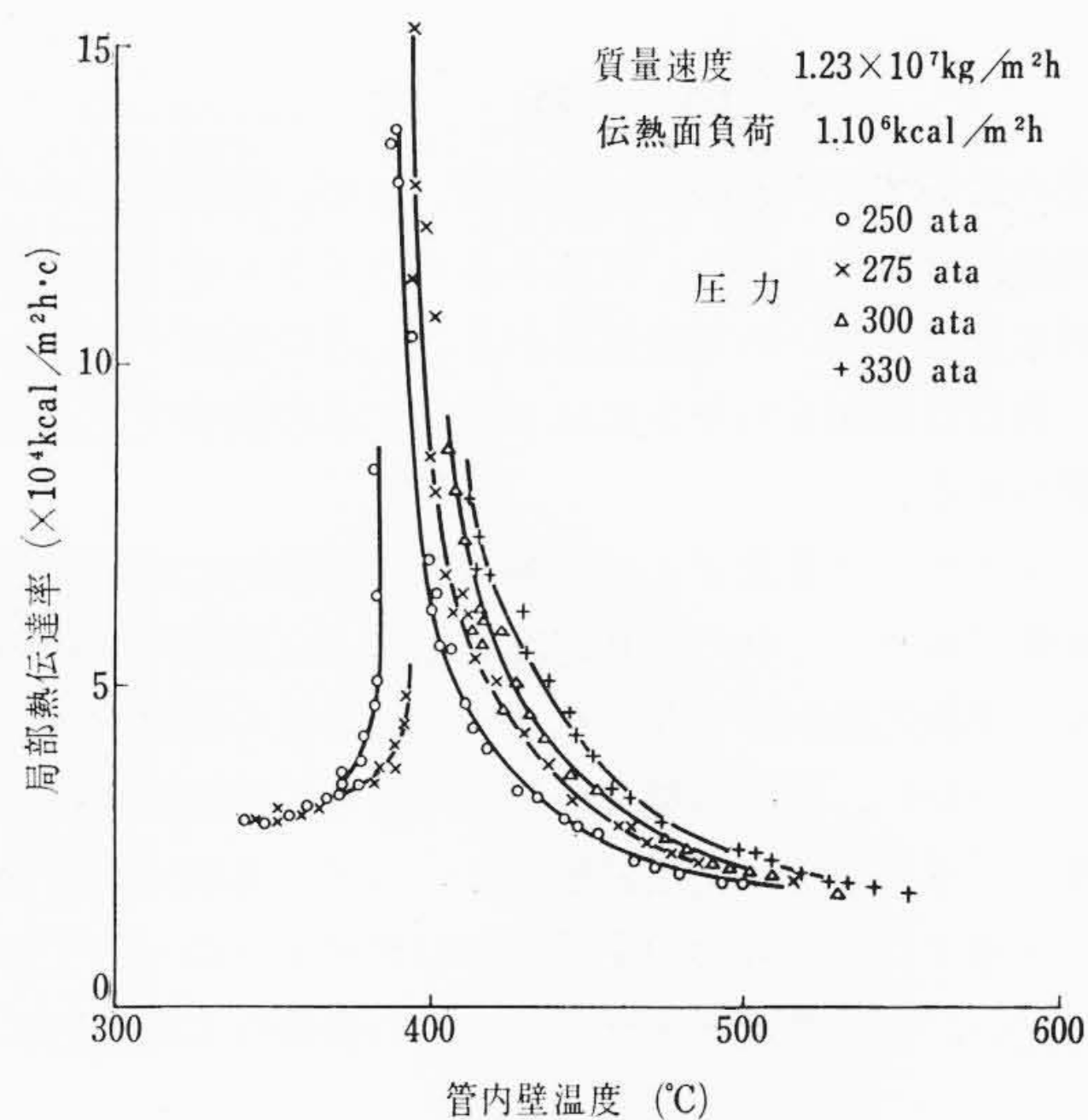
テストセクション入口の温度、圧力および流量はそれぞれテストボイラの燃焼率と汽水ミキサーへの注水量、減圧弁開度およびボイラ給水ポンプのストロークによって調整し、伝熱量はパイプへの通電量によって加減する。また実験中のボイラ入口給水条件は全固形物 0.5 ppm 以下、溶存酸素 5 ppb 以下、PH=9.0~9.5 に押えられている。

第5図は管内径 12φ、質量速度 $8.0 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{h}$ 、伝熱面負荷 $8.4 \times 10^5 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ の同一条件下における超臨界圧状態 (300 ata) と亜臨界圧状態 (200 ata) における管壁温度の比較、すなわち伝熱特性の相違を示したものである。図から明らかなように管壁温度は亜臨界圧においては極大、極小のある特異な変化を示すが、超臨界圧においては単調な変化を示している。

亜臨界圧の場合、エンタルピが 350 kcal/kg 以上になると、核沸騰があらわれ蒸気泡のかく乱により伝熱特性が向上し管壁温度が一定となる。そしてエンタルピが 450 kcal/kg になると膜沸騰が始まり伝熱特性の悪化によって管壁温度は急激に上昇する。その後エンタルピの増加とともに管壁温度が減少するのは流速増加によって蒸気膜ははく離するためであり、再び管壁温度が上昇するのは管内がすべて蒸気になるためである。膜沸騰開始点すなわち管壁温度の異常上昇点は熱負荷が大きいほど低エンタルピ側に移行する。

一方超臨界圧においては熱伝達が良くなるが、亜臨界圧のように膜沸騰によって熱伝達が悪化し、管壁温度が異常に上昇するということは認められなかった。

第6図は超臨界圧水の局部熱伝達率を管内壁温度にて整理したも



第6図 超臨界圧水の熱伝達率

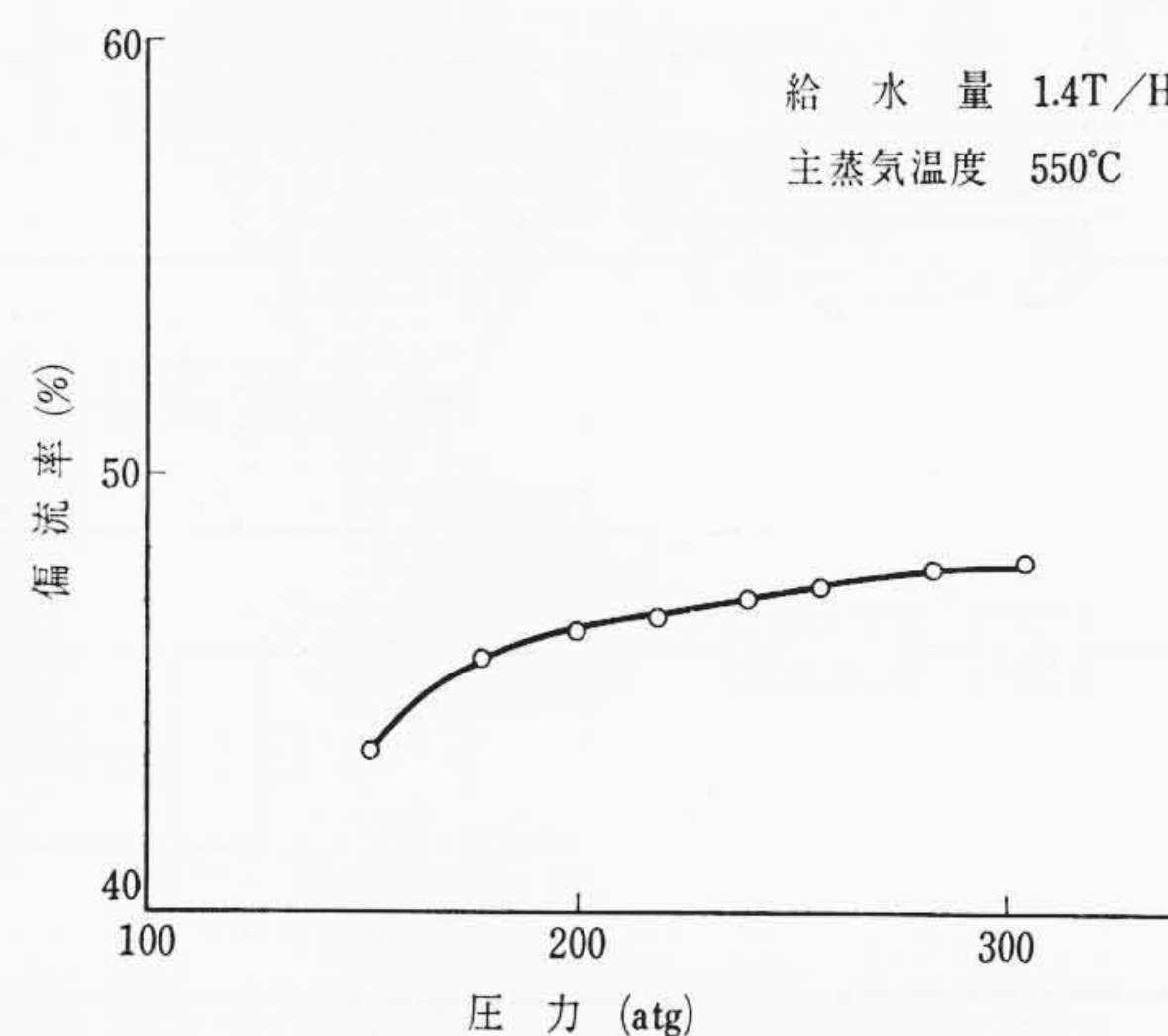
のである。この図から明らかなように超臨界圧水の熱伝達はきわめてよく、ある温度で極大値を示す。この温度はその圧力の定圧比熱が極大となる擬遷移点(Pseudotransition Point)とほぼ一致する。すなわち局部熱伝達率の極大値は圧力が高いほど管壁温度の高いほうに移行している。この熱伝達率が擬遷移点付近で急激に増大するのは K. Goldmann 氏⁽⁶⁾が指摘するように超臨界圧においても沸騰類似現象があるためと思われる。

超臨界圧水の熱伝達率の無次元整理法について Мировпольский 氏⁽⁷⁾などの提案があるが、いずれも擬遷移点付近の整理に問題がありさらに検討の要がある。

貫流ボイラでは水壁などの並列管の偏流対策がボイラ設計上の大きな問題である。本テストボイラは流動系統を2系列とし、偏流の発生条件およびその対策を研究できるようになっている。

第7図はその実験結果の一例で、運転圧力の偏流に及ぼす影響を示したものである。縦軸は2系統の流量に対する片側系統の流量の割合をあらわしている。実験は給水流量、主蒸気温度、空気過剰率など圧力以外の諸条件を一定とし、主蒸気圧力のみをボイラ出口の減圧弁にて変えた場合である。同一条件の場合、亜臨界圧に比べて超臨界圧のほうが偏流が起きにくく安定である。超臨界圧においても圧力が高いほど偏流が少なくなる。また温度が高いほど、流量が少ないほど偏流が大きくなることも明らかとなった。

一方偏流防止対策として流量調整弁の有効性も実証できたが、その調整をいかなる条件のもとに行なうかが問題である。すなわち調整しても運転条件が変わると逆の偏流が起こることもあるからである。



第7図 偏流に及ぼす圧力の影響

4. 動特性

超臨界圧においては汽水混合状態がないため、超臨界圧ボイラの形態は必然的に貫流式となる。貫流ボイラはドラムがなく、管肉厚も管内保有水量も少ないので応答性がよい。この長所をいかんなく発揮させ、良好な制御を行なうにはまずボイラの動特性を正確には握る必要がある。

本テストボイラには貫流ボイラの動特性を実験的に検討するための種々の装置があり、これにより超臨界圧および亜臨界圧状態における動特性の実験的検討を行なった。一方動特性の理論解析をアナコンによって行ない、実験結果との対比によって理論解析の妥当性を確認できた。またすでに営業運転にはいっている新清水火力発電所のペンソンボイラ、五井火力発電所のUPボイラにおいて動特性の実測を行ない、実物貫流ボイラプラントの動特性も数値的には握っている。

理論解析としては

$$\text{ガスから管壁への伝熱: } R_2 - R_1 = C \frac{\partial \theta'}{\partial t} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{管壁から流体への伝熱: } R_1 = H(\theta' - \theta) \dots\dots\dots (2)$$

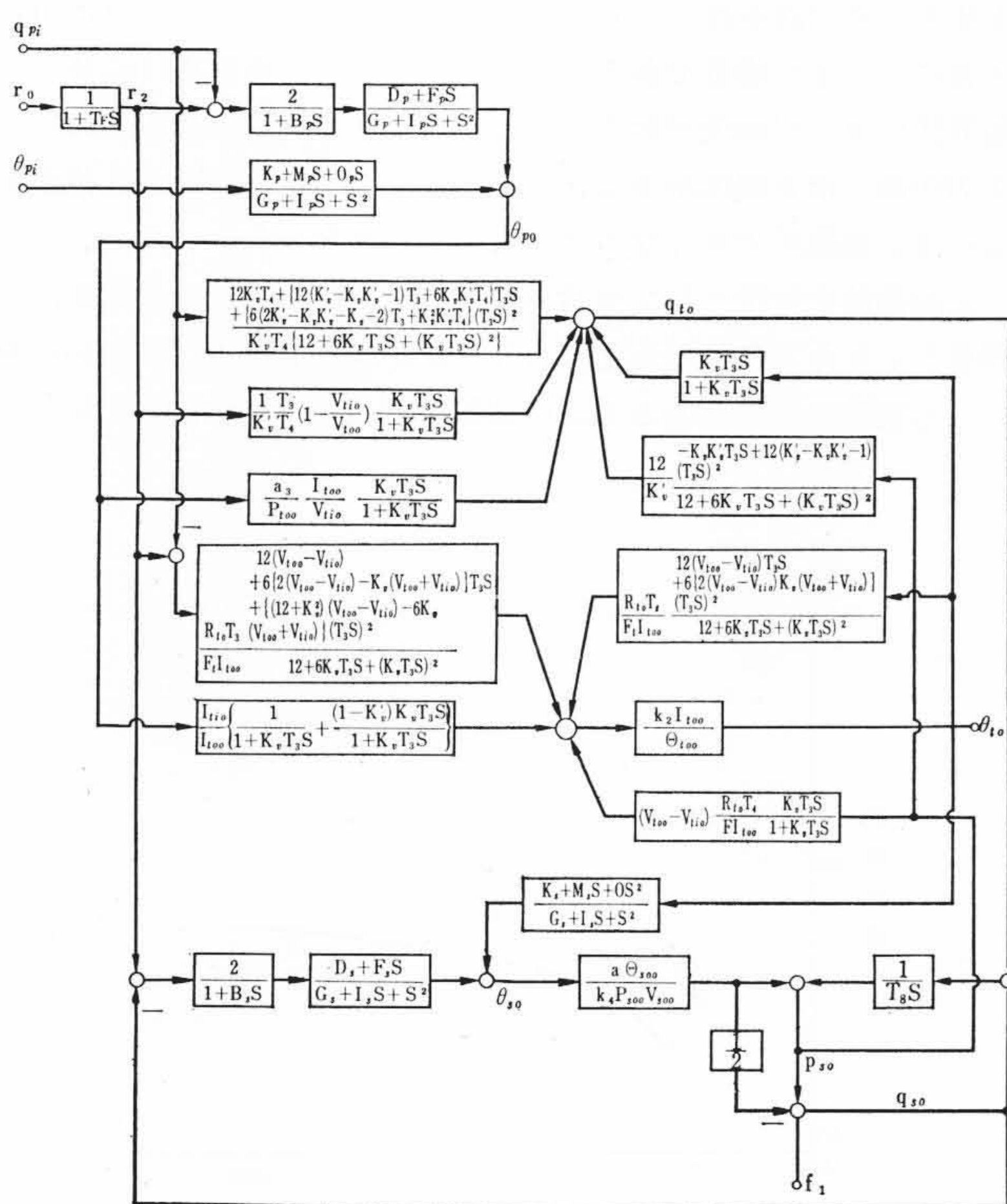
$$\text{流体のエネルギー式: } R_1 = Q \frac{\partial I}{\partial L} + \frac{F}{V} \frac{\partial I}{\partial t} \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{流体の連続の式: } \frac{\partial Q}{\partial L} = \frac{F}{V^2} \frac{\partial V}{\partial t} \dots\dots\dots (4)$$

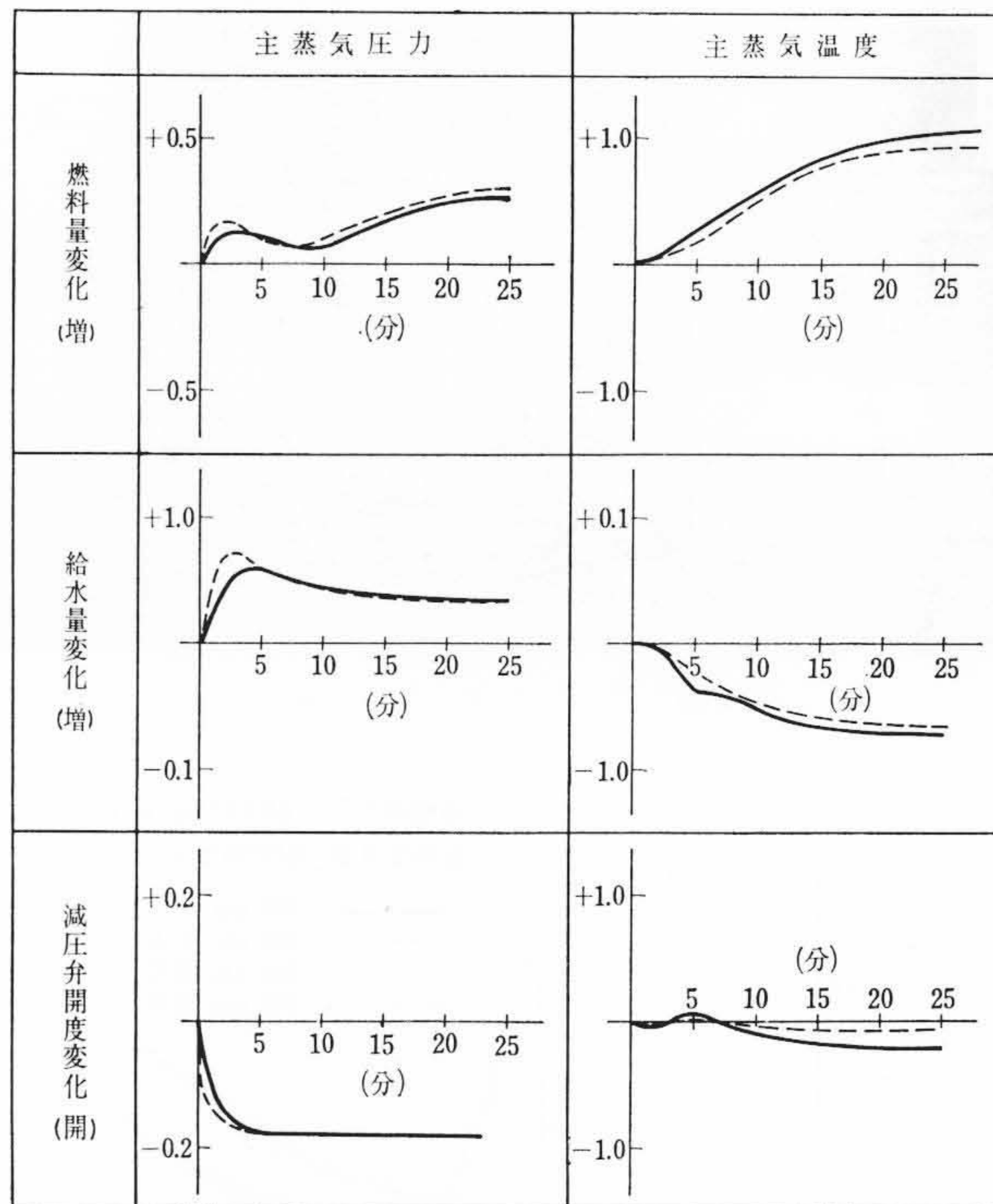
$$\text{圧力降下: } \frac{\partial P}{\partial L} = -KQ^2 V \dots\dots\dots (5)$$

の基本式から出発し、ボイラを予熱、移相および過熱の各部分に分けてそれぞれの部分について定常状態からの微小変化を考え、基本式を線形化してアナコンにより解析した⁽⁸⁾。第8図は超臨界圧ボイラの総合的なブロック線図である。

第9図は超臨界圧状態におけるテストボイラによる動特性の実測結果とアナコンによる解析結果を比較のために示したものである。この結果は燃料量、給水量およびボイラ出口の減圧弁開度などの操作量をそれぞれ単独にステップ状に変えた場合のインデシャル応答



第8図 超臨界圧ボイラブロック線図



初期運転条件 { 給水量 1.4T/H
主蒸気圧力 250ata
主蒸気温度 550°C

縦軸: $\frac{\text{蒸気値変化分}}{\text{蒸気値初期値}} \bigg/ \frac{\text{操作量変化分}}{\text{操作量初期値}}$

—— 実測値
----- 理論値

第9図 テストボイラ動特性の一例

で、数回の同一テストの平均値を示す。図の縦軸は操作量の変化率(変化量/初期値)に対する圧力、温度などの変化率(変化量/初期値)の割合を示す。

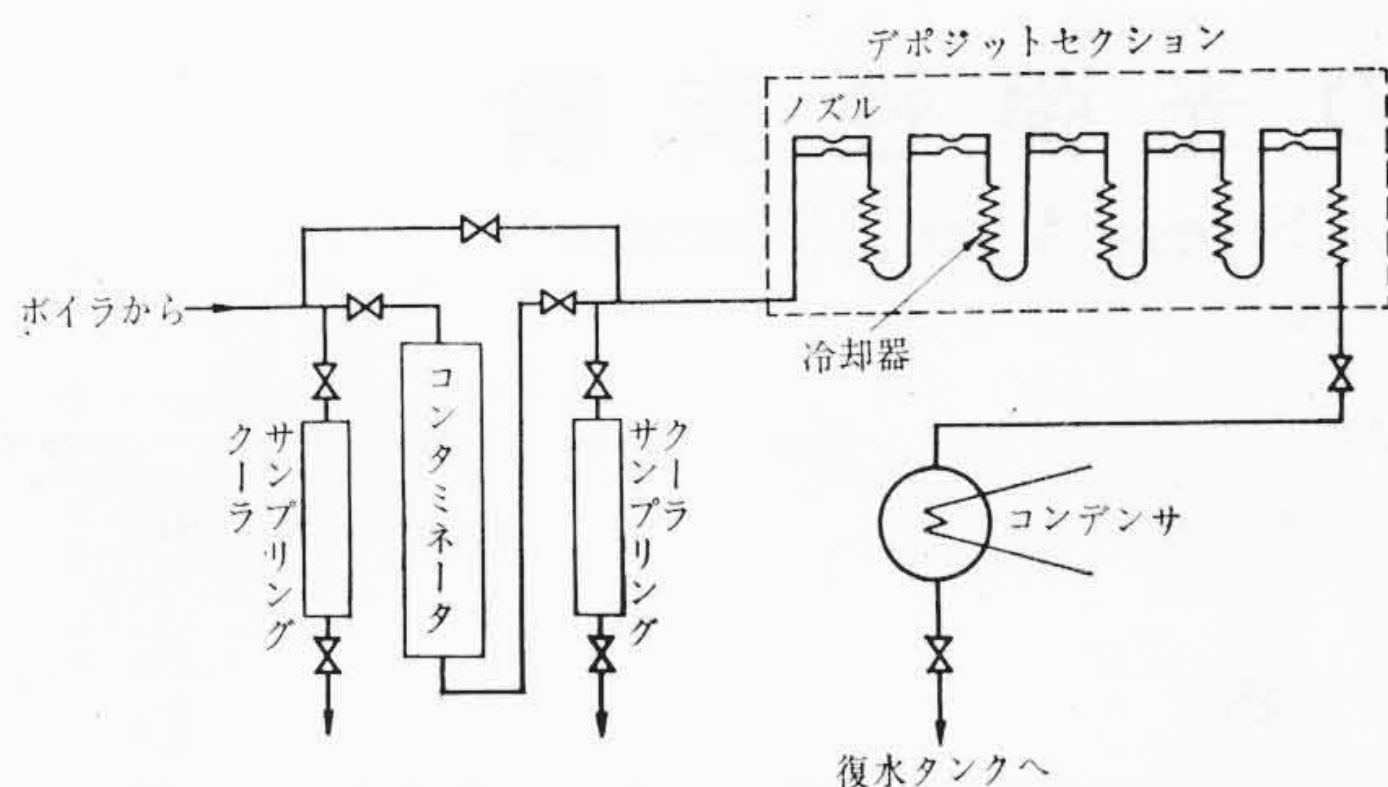
燃料変化に対し、主蒸気圧力は増加、減少、増加の変化、主蒸気温度はほぼ2次おくれに近い変化となっている。主蒸気圧力の第1の山は遷移部の急激な体積膨張に伴う主蒸気流量の増加によるものであり、再増加は主蒸気の比体積増加と弁特性によるものである。給水量変化に対し、主蒸気温度の変化は途中で一時止まるような変化をする。これは遷移部の圧力変化に伴う遷移部温度の逆応答と流動おくれに起因するためである。

テストボイラにより超臨界圧と亜臨界圧状態における動特性の実測結果を比較すると、亜臨界圧状態においては圧力に及ぼす燃料量と給水量の影響にはそれほど差異が認められないが、超臨界圧状態の場合には圧力に及ぼす影響は給水量のほうが燃料量よりも大きい。

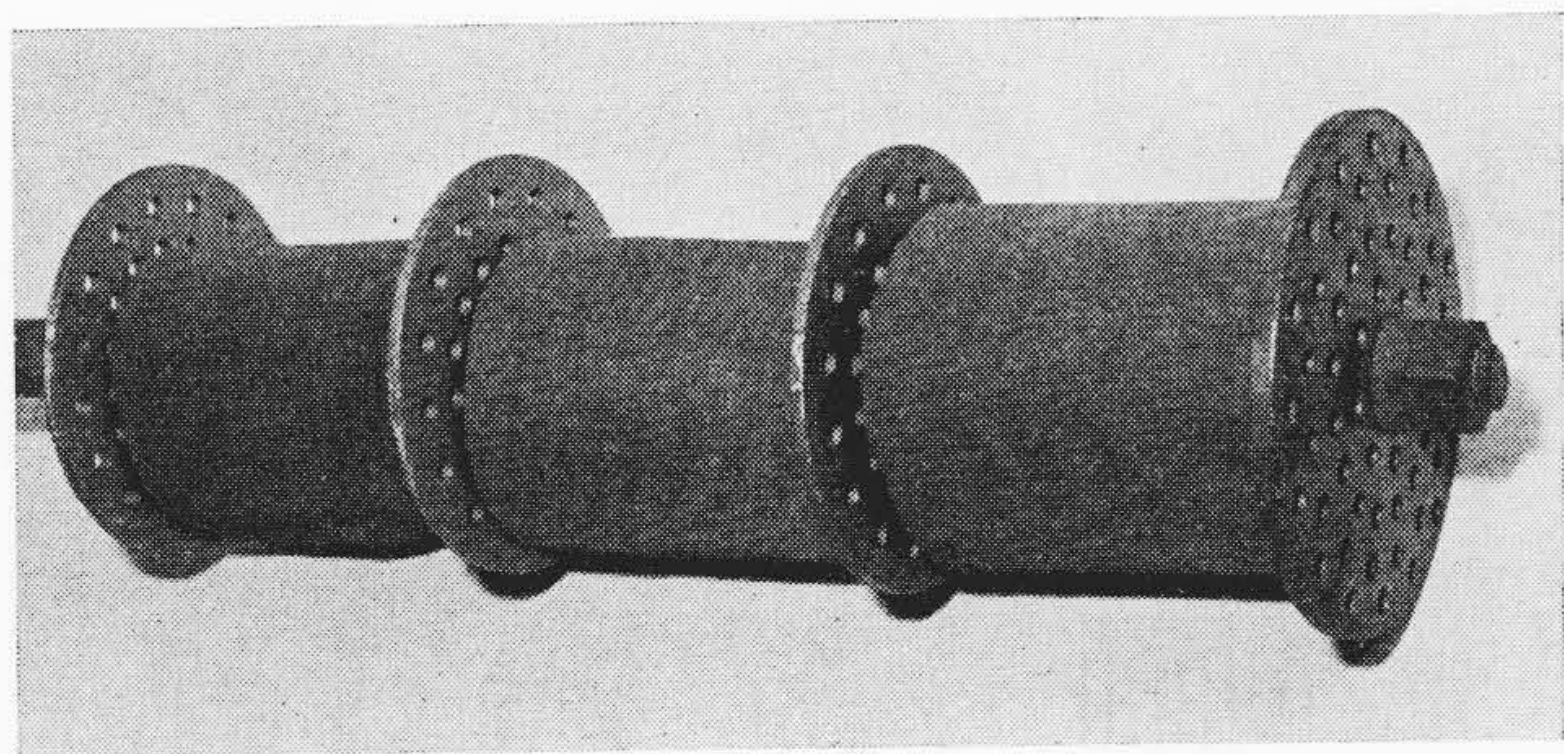
これらの動特性のデータはプラントの制御特性の解析に用いられ、超臨界圧プラントの新しい制御方式の開発研究に役だてられている。

5. 銅の溶解、析出

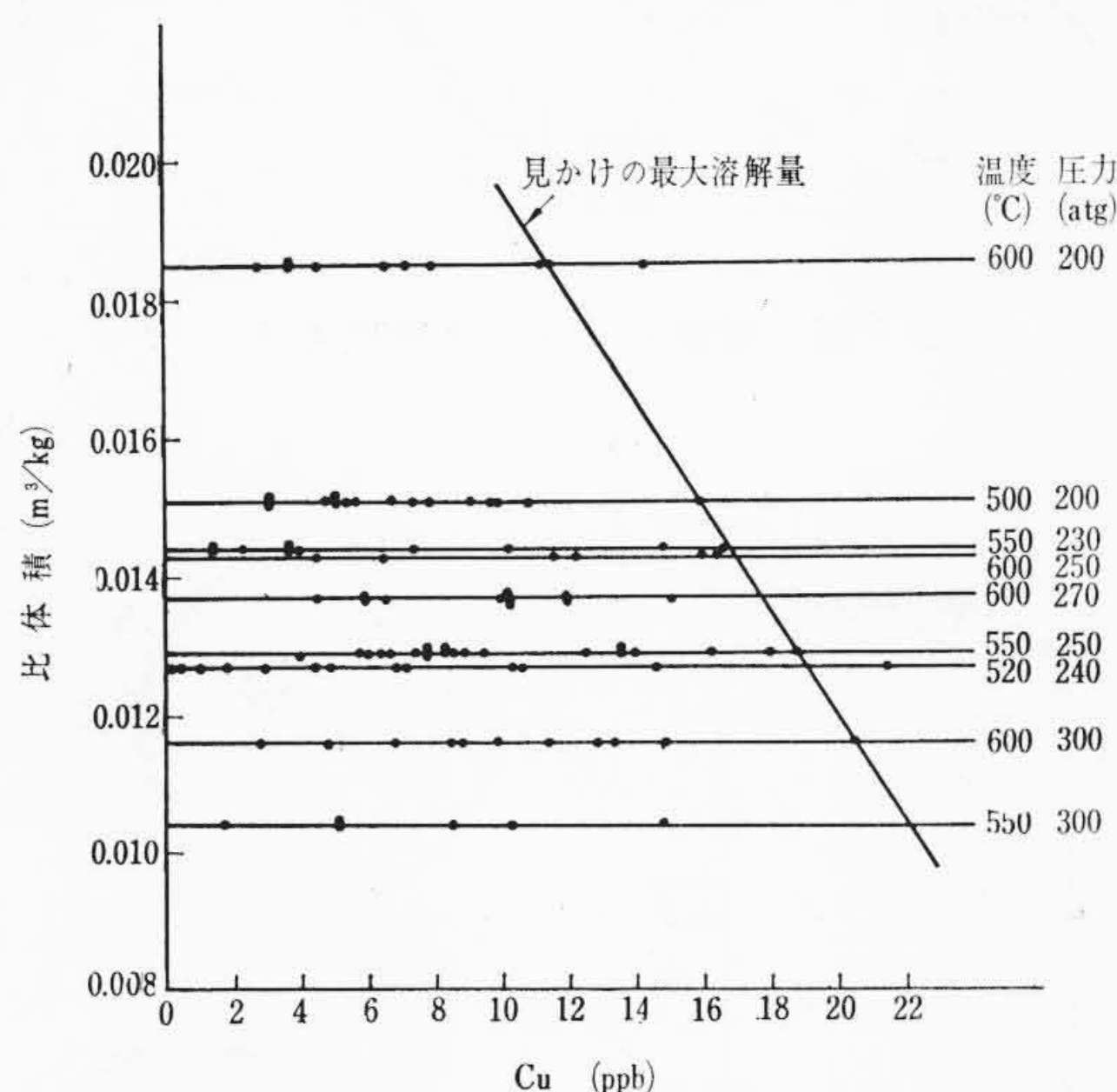
世界最初の事業用超臨界圧プラントとして運転開始したアメリカの Philo 6号機は運転開始後1年未満にしてタービン効率が6%低下し、スラストが上昇するという問題が生じた。その後タービンをオーバーホールした結果、これらの原因は高圧タービンのブレードおよび隔板に多量にデポジットした銅酸化物に起因することが発見された⁽⁹⁾。このように超臨界圧プラント開発に当たっては超臨界圧蒸気への銅の挙動が問題となるため、本テストプラントにおいては始めから超臨界圧蒸気における銅の溶解および析出を究明する研究装置がボイラ出口に設置されている。この装置は銅材料を入れるコンタミネータと蒸気を減圧減温するノズル、冷却器からなるデポジッ



第10図 銅の溶解、析出実験装置の概略系統図



第11図 コンタミネータ内にそう入せる銅網と支持具

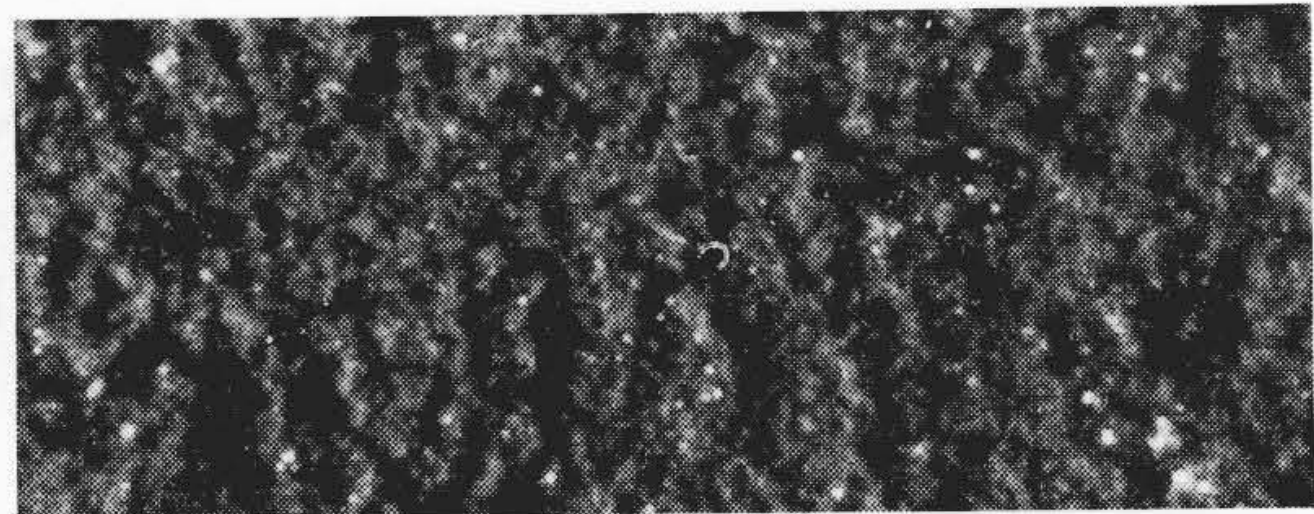


第12図 過熱蒸気中への銅の溶解

トセクションとから構成されている。第10図はこの装置の概略系統図である。

コンタミネータには第11図に示すような支持具に銅の金網（約50メッシュ）を取り付けたものを入れ、銅と過熱蒸気とを接触させる。

第12図は長時間にわたり種々な蒸気条件にて実験した過熱蒸気中への銅の溶解度を蒸気の比体積にて整理したものである。各条件における銅の溶解度の最大値は比体積が小さくなるとほぼ直線的に大きくなっていく。この最大溶解度はサンプリングラインに銅がデポジットすることを考慮するならば、そのときの蒸気条件における銅の飽和溶解度に近いものと考えられる。溶解度に対する圧力、温度の影響はそれほど明確にはつかめなかったが、圧力が高ければ高



第13図 赤褐色デポジットの顕微鏡写真 (×50)

いほど溶解度が大きくなる傾向ははっきりしている。

実験終了後ノズルを切断してみると第1段ノズル内面に赤褐色のものが多量に付着していた。この付着物をX線回折により調べたところ、その成分は Cu_2O がほとんどでその他少量の CuO が含まれていた。第13図はこの付着物の顕微鏡写真である。この赤褐色の付着物の最も多いのはノズルの絞り部でその厚さは約 50μ であった。次に多量に付着していたところはノズルの膨張部であった。第2段以下のノズルのデポジットがほとんど見られなかったが、第3段ノズルには少量のシリカがデポジットしていた。このことから過熱蒸気中に銅、シリカが溶解している場合、タービンの高圧段には銅、低圧段にはシリカがデポジットする。またコンタミネータ中の銅網および銅製の網支持具の表面はほとんど酸化され黒色の CuO になっていた。

本実験によって銅の超臨界圧蒸気に対する溶解、析出が定性的、定量的にわかったが、現在さらに種々のノズルを取り付けて実験を進めている。

6. 結 言

超臨界圧テストプラントによる研究成果のうち、超臨界圧水の伝熱流動、超臨界圧ボイラの動特性、超臨界圧蒸気中の銅の挙動などの実験結果を中心にして述べてきた。このほかの研究も現在さらに進められており、それらについては別の機会に報告したい。テストプラントを直接使用しない研究たとえば鉄、銅、シリカなどの自動分析計の開発研究、耐熱銅の基礎的、応用的研究も別個に進められており、すでにそれらの研究結果は具体化されている。

このように日立製作所においてはテストプラントによる研究を中心に超臨界圧プラントに対する多くの設計資料が得られるとともに種々の経験を積んで、超臨界圧時代の態勢をかためている。

参 考 文 献

- (1) 浦田, 吉原, 前田: 日立評論 43, 1075 (昭 36-9)
- (2) 綿森, 前田: 機学誌 65, 521 (昭 37-4)
- (3) Z. Tamura, Y. Kawaguchi, Y. Nakano: Hitachi Review, 5, 17 (Dec. 1962)
- (4) 浦田: OHM, 51, 54 (昭 39-4)
- (5) N. L. Dickinson, C. P. Welch: Trans. ASME, 80, 746 (April, 1958)
- (6) K. Goldmann: Chemical Engineering Progress Symposium Series, 50, 105 (1954)
- (7) З. Миропольский: Энергомашиностроение, 1, 8 (Jan. 1958)
- (8) 中野, 河竹: 日立評論 44, 1309 (昭 37-9)
- (9) T. T. Frankenberg, A. G. Lloyd, E. B. Morris: Proc. American Power Conf., 21, 169 (1954)